25.1. فرق الكمون والكمون الكهربائي

25.2. فرق الكمون في حقل منتظم

25.3. الكمون الكهربائي وطاقة الكمون العائدة لشحن نقطية

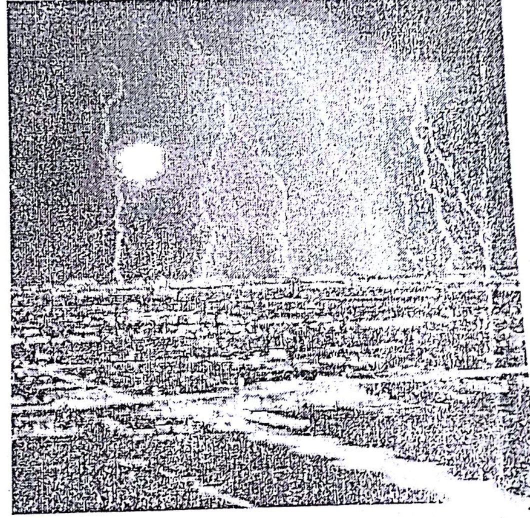
25.4. الحصول على قيمة الحقل الكهربائي من الكمون الكهربائي

25.5. الكمون الكهربائي العائد إلى توزع مستمر للشحنة (الشحن)

25.6. الكمون الكهربائي العائد إلى ناقل مشحون

25.7. تجربة قطرة -الزيت لميليكان

25.8. تطبيقات علم الكهراكدة (الكهرباء الساكنة)



إن العمليات التي تحدث في أثناء تشكل العواصف الرعدية تسبب فرقاً كبيراً في الكمون الكهربائي بين العاصفة الرعدية والأرض. ونتيجةً لفرق الكمون هذا يحدث انفراغاً كهربائياً يسمى البرق.

لقد تحدثنا عن مفهوم الطاقة الكامنة *potential energy* في الفصل 8 (من الفيزياء العامة 1)، وذلك عند الحديث عن القوى المحافظة[1] مثل قوة الثقالة الأرضية وقوة المرونة للنوابض. ولقد

---

[1] نقول عن قوة ما أنها محافظة إذا كان العمل الذي تقوم به هذه القوة يتعلق فقط بالموضعين الابتدائي والنهائي للجسم الاختباري ولا يتعلق بالطريق الذي يسلكه هذا الجسم بين هذين الموضعين. وبالمثل نقول عن حقل القوة أنه محافظ إذا ما جرى نقل الجسم الاختباري من موضعه إلى موضع آخر ضمن الحقل الكهربائي بفعل عامل خارجي، فإن حقل القوة الكهربائي يقوم بعمل على الجسم الاختباري مساوٍ للعمل الذي قام به العامل الخارجي المسبب للانتقال؛ أي أن الحقل يحتفظ بالطاقة المقدمة للجسم الاختباري؛ أي يحافظ عليها؛ أي يختزنها، فهو محافظ.

تجلت حينئذ أهمية مفهوم الطاقة الكامنة بما يلي: عند استخدامنا لقانون انحفاظ الطاقة استطعنا عند حل مسائل متنوعة في الميكانيك أن نتجنب التعامل بصورة مباشرة مع القوى. كذلك إن مفهوم الطاقة الكامنة ذا أهمية كبيرة أيضاً في دراسة الكهرباء، نظراً لأن القوة الكهراكدة[2] (الكهرساكنة) هي أيضاً قوة محافظة، ولهذا فإنه من الممكن أن نَصِف الظواهر الكهراكدة بصورة ملائمة مريحة بمصطلح الطاقة الكامنة الكهربائية. إن هذه الفكرة تمكننا من إدخال (تعريف) مقدار سَلْمي[3] يُدعى **الكمون الكهربائي** *electric potential*. وبما أن الكمون الكهربائي عند أي نقطة في حقل كهربائي هو مقدار سلمي، فإنه استخدامنا له سيمكننا من وصف الظواهر الكهراكدة بصورة أكثر بساطة مما لو اعتمدنا فقط على المقدارين المتجهين **الحقل الكهربائي** و**القوة الكهربائية**. كما أن لمفهوم الكمون الكهربائي أهمية عملية كبيرة جداً في عمل الدارات والأجهزة الكهربائية التي ستدرس في فصول أو مقررات متأخرة.

25.1. فرق الكمون والكمون الكهربائي

عندما نضع شحنة اختبارية q_0 في حقلٍ كهربائي E متولد عن توزعِ شحني-مُصدر (منبع)، فإن هذه الشحنة ستخضع لقوة الكهربائية قدرها Eq_0. إن القوة الكهربائية Eq_0 التي تُمارس على الشحنة الاختبارية q_0 هي **قوة محافظة**، لأن القوة التي تنشأ بين الشحن الكهربائية التي يمكن وصفها بقانون كولون هي قوة محافظة. فعندما يجري نقل (إزاحة) الشحنة الاختبارية q_0 عن موضعها ضمن حقلٍ كهربائي بفعل عامل خارجي (قوة خارجية)، فإن حقل القوة الكهربائية يقوم بعمل على الشحنة الاختبارية q_0 مساوٍ للعمل الذي قام به العامل الخارجي المُسبب للإزاحة. وهذا مشابه لما يحصل لجسم اختباري عند نرفعه ضمن حقل الجاذبية الأرضية، حيث إن قوة الجاذبية هي قوة محافظة أيضاً، فعندما يكون مقدار الإزاحة (الانتقال) h، فإن العمل الذي قام به العامل الخارجي يكون mgh (القوة ضرب الانتقال؛ الإزاحة)، ويكون العمل الذي قامت به قوة الثقالة الأرضية (التجاذب) على الجسم مساوٍ لمقدار التغير في الطاقة الكامنة للمنظومة أرض-جسم؛ $-mgh$. إشارة السالب تعود إلى أن الطاقة الكامنة للمنظومة أرض-جسم تصبح أقل كلما كانت المسافة بين الجسم والأرض أصغر.

عند تُجرى الدراسات التحليلية للحقول الكهربائية والمغناطيسية، من الشائع عملياً، أن يستخدم الرمز ds للدلالة على **متجهة الإزاحة (الانتقال)** المتناهي في الصغر (العنصري)، الذي يكون اتجاهه في الفضاء مماساً لمسار الشحنة. وبما أن مسار الشحنة يمكن أن يكون مستقيماً أو منحنياً،

---

[2] الظواهر الكهراكدة؛ الكهرساكنة؛ هي ظواهر الكهرباء الراكدة أو الكهرباء الساكنة؛ أي الظواهر التي تبديها الشحن الكهربائية الساكنة أو المتوازنة.

[3]. إن كلمة سَلْمي لقد اشتقت من السَلْم؛ أي السلام؛ ضد الحرب. أما كلمة متجه أو شعاع فقد اشتقت من "سهم" التي تعني الحرب.

فإن التكامل الذي ينجز على طول هذا المسار يدعى إما **تكامل المسار** (المنحني) *path integral* أو **تكامل الخط** (المستقيم) *line integral* (إن هذين المصطلحين هما مترادفين).

فمن أجل إزاحةٍ لا متناهية في الصغر ds لشحنة اختبارية موجبة q_0 ضمن حقل كهربائي، فإن العمل الذي يقوم به حقل القوة الكهربائية (الحقل الكهربائي) على q_0 سيكون هو الجداء السلمي للقوة في الانتقال:

$$F \cdot ds = q_0 E \cdot ds$$

وبما أن هذه الكمية من العمل يقوم بها الحقل الكهربائي، فإن الطاقة الكامنة للمنظومة حقل-شحنة ستتغير بنفس المقدار لكن بإشارة سالبة:

$$dU = -q_0 E \cdot ds$$

ومن أجل إزاحة محددة للشحنة من نقطة (موضع) A إلى نقطة (موضع) B، فإن التغير في الطاقة الكامنة للمنظومة بين هذين الموضعين $\Delta U = U_B - U_A$ سيكون:

$$\Delta U = -q_0 \int_A^B E \cdot ds \qquad (25.1)$$ التغير في الطاقة الكامنة للمنظومة

حيث يُجرى التكامل على طول المسار الذي تسلكه الشحنة q_0 في أثناء تحركها من الموضع A إلى الموضع B. وبما أن القوة $q_0 E$ هي قوة محافظة، فإن تكامل المُجرى لن يعتمد على شكل المسار الذي تسلكه الشحنة بين A و B، بل يعتمد فقط على الموضعين الابتدائي والنهائي A و B.

من أجل كل موضع للشحنة الاختبارية في الحقل الكهربائي، تمتلك المنظومة شحنة-حقل طاقة كامنة U تتعلق قيمتها بالموضع النسبي للشحنة في المنظومة (أي البعد بين الشحنتين)، وبالتالي من أجل موضع معين هو اللانهاية تكون هذه القيمة معدومة $U = 0$.

وبتقسيم الطاقة الكامنة على الشحنة الاختبارية q_0 نحصل على مقدار فيزيائي يعتمد فقط على توزع الشحنة-المصدرة (المنبع)؛ أي أن الطاقة الكامنة بوحدة الشحنة U/q_0 هو مقدار فيزيائي مستقل عن قيمة الشحنة q_0؛ أي لا يعتمد على q_0، وله قيمة عند كل نقطة من النقاط في الحقل الكهربائي. نسمي النسبة (U/q_0) **بالكمون الكهربائي** (أو **الكمون**) ويرمز لها بـ V. وهكذا فإن الكمون الكهربائي عند أي نقطة في الحقل يكون:

$$V = U/q_0 \qquad (25.2)$$

إن حقيقة كون الطاقة الكامنة هي مقدار سلمي يعني أن الكمون الكهربائي هو أيضاً مقدار سلمي.

كما هو موصوف في المعادلة (25.1)، إذا تحركت الشحنة الاختبارية بين موضعين A و B في حقل كهربائي، فإن المنظومة شحنة-حقل ستعاني تغيراً في الطاقة الكامنة. وبالتالي، فإنه يمكننا أن نعرف **فرق الكمون** بين النقطتين A و B في حقل كهربائي $\Delta V = V_B - V_A$ بأنه التغير في

الطاقة الكامنة للمنظومة شحنة-حقل ΔU عندما تتحرك شحنة اختبارية (موجبة) بين هاتين النقطتين مقسوماً على الشحنة الاختبارية q_0؛ أي أنه تغير الطاقة الكامنة بوحدة الشحنة:

فرق الكمون بين نقطتين
$$\Delta V \equiv \frac{\Delta U}{q_0} = -\int_A^B E \cdot ds \qquad (25.3)$$

تماماً كما هو الحال بالنسبة للطاقة الكامنة، إن الفروق في الكمون الكهربائي *differences* in electric potential هي فقط التي يكون لها أهمية (وليس الكمون بحد ذاته). لكن، على كل حال، لتفادي التعامل مع فروق الكمون، غالباً ما نأخذ إحدى قيمتي الكمون الكهربائي بحيث تكون معدومة عند نقطة ملائمة ما في الحقل الكهربائي (اللانهاية).

يجب عدم الخلط بين فرق الكمون والفرق في الطاقة الكامنة. ففرق الكمون بين نقطتين A و B يعتمد على توزع الشحنة-المصدرة (باعتبار أن النقطتين A و B لا تمثلان شحن اختبارية)، بينما الفرق في الطاقة الكامنة يكون له وجود فقط إذا كان هنالك شحنة اختبارية تتحرك بين هاتين النقطتين. **إذن فالكمون الكهربائي هو ميزة (صفة) سلمية للحقل الكهربائي، وهو مستقل عن أي شحنات يمكن وضعها في الحقل (أي لا يعتمد على قيمة الشحنة التي نضعها في الحقل).**

إذا حرّك عاملٌ خارجيٌ شحنة اختباريةً من A إلى B من دون أن يُحدث تغيراً في الطاقة الحركية للشحنة الاختبارية، فإن العامل يكون قد أنجز عملاً سبب تغيراً للطاقة الكامنة للمنظومة: $W = \Delta U$. إن الشحنة الاختبارية q_0 تستخدم كأداة ذهنية لتعريف الكمون الكهربائي ليس إلا. تخيل أن شحنة ما (كيفية) q موضوعة في حقل كهربائي. إن العمل المنجز من قبل العامل الخارجي في تحريك شحنة q خلال الحقل الكهربائي بسرعة ثابتة سيكون، بحسب المعادلة (25.3):

$$W = q\Delta V \qquad (25.4)$$

بما أن الكمون الكهربائي هو قياس للطاقة الكامنة بوحدة الشحنة، ووحدة الطاقة في الجملة الدولية هي الجول J ووحدة الشحنة هي الكولون C، فإن وحدة كل من الكمون الكهربائي وفرق الكمون الكهربائي في الجملة الدولية ستكون هي $1\,J$ لكل $1\,C$، وتعرّف بأنها $1\,V$ **فولط** (V)؛ أي:

$$1\frac{J}{C} \equiv 1\,V$$

وهذا يعني، أن $1\,J$ يمثل العمل الذي يُنجز لتحريك شحنة قدرها $1\,C$ عبر فرق في الكمون قدره $1\,V$.

تدل المعادلة (25.3) أيضاً أن فرق الكمون يمتلك وحدات الحقل الكهربائي مضروبة بوحدة المسافة. من هذا ينتج أن وحدة الحقل في الجملة الدولية (N/C) يمكن أن يُعبر عنها أيضاً بالفولط لكل متر (V/m):

$$\frac{1\,J}{1\,C} = \frac{1N\cdot 1m}{1\,C} \qquad 1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$$

لذلك، يمكننا تفسير الحقل الكهربائي **بأنه قياس لمعدل تغير الكمون الكهربائي مع موضع.**

إن وحدة الطاقة الأكثر استخداماً في الفيزياء الذرية والنووية هي **الإلكترون فولط** (eV)، الذي يعرف بأنه الطاقة التي تكتسبها المنظومة حقل-شحنة أو تفقدها عندما تتحرك شحنة ذات قيمة e (أي شحنة إلكترون أو بروتون) خلال فرق كمون قدره 1 V:

$$1\ \text{eV} = 1.60 \times 10^{-19}\text{C} \cdot 1\ \text{V} = 1.60 \times 10^{-19}\ J$$

على سبيل المثال، إن إلكترون في حزمة أنبوبة صورة تلفاز نموذجية يمكن أن يمتلك سرعة $3.0 \times 10^{7} m/s$. وهذا يوافق طاقة حركية قدرها 4.1×10^{-16} J، التي تكافئ 2.6×10^{3}eV. إن مثل هذا الإلكترون يجب أن يتسارع من السكون خلال فرق كمون قدره 2.6 kV حتى يبلغ هذه السرعة.

تحذير (25.1): حول الكمون والطاقة الكامنة

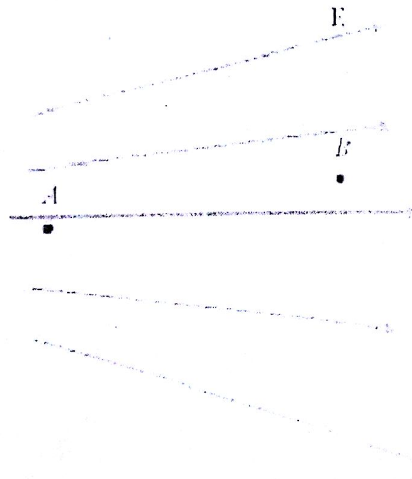
إن الكمون هو ميزة تخص الحقل فقط، وهو مستقل عن الشحنة الاختبارية التي يمكن وضعها في الحقل. **وإن الطاقة الكامنة هي ميزة تخص المنظومة حقل-شحنة** لأنها تعود إلى التأثير المتبادل بين حقل الشحنة-المصدرة والجسيمة المشحونة (الاختبارية) التي توضع في الحقل.

تحذير: بالنسبة للجهد (الفولطية)

هنالك العديد من العبارات (الألفاظ) التي تستخدم لوصف فرق الكمون بين نقطتين، التي أكثرها شيوعاً هي الجهد أو الفولطية التي مصدرها هو وحدة الكمون (الفولط). فالجهد **المطبق** على أي جهاز (أو **عبر** أي جهاز)، مثل التلفاز، هو مطابق لفرق الكمون عبر الجهاز. فإذا قلنا أن الجهد المطبق على مصباح كهربائي هو $120\ volts$ فولط، فإننا نقصد أن فرق الكمون بين التماسين الكهربائيين على المصباح الكهربائي (قطبيه) هو $120\ volts$ فولط.

اختبار سريع (25.1):

في الشكل (25.1) هنالك نقطتين A و B موجودتين ضمن منطقة يوجد فيها حقل كهربائي. إن فرق الكمون بين A و B؛ أي $\Delta V = V_B - V_A$ يكون:



الشكل (25.1): (الاختبار السريع 25.1) نقطتين في حقل كهربائي.

(a) موجب، (b) سالب،، (c) صفر.

$$\Delta V = V_B - V_A \equiv \frac{\Delta U}{q_0} = -\int_A^B E \cdot ds$$ فرق الكمون بين نقطتين

تحذير: بالنسبة للإلكترون-فولط

إن الإلكترون-فولط eV هو وحدة قياس للطاقة وليس كموناً. حيث إنه يمكن التعبير عن طاقة أي منظومة بوحدة eV، وهذه الوحدة هي الأكثر ملائمة في تقدير طاقة إصدار وامتصاص الضوء المرئي من الذرات. أما طاقة العمليات النووية فغالباً ما يُعبر عنها بميغا إلكترون فولط MeV.

اختبار سريع (25.2):

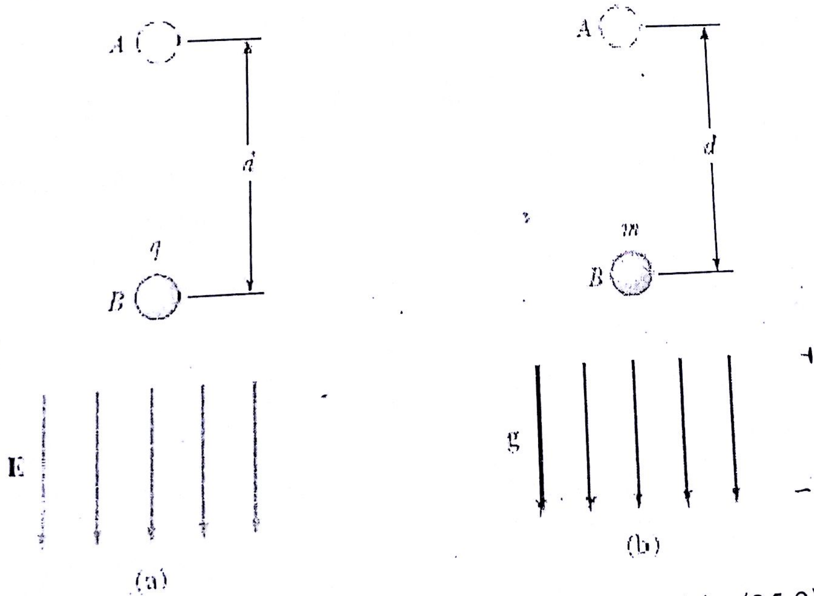
في الشكل (25.1) وضعت شحنة سالبة عند النقطة A ثم حُركت إلى النقطة B. إن التغير في الطاقة الكامنة للمنظومة حقل-شحنة بالنسبة لهذه العملية يكون: (a) موجب،، (b) سالب، (c) صفر.

$$\Delta U = -q_0 \int_A^B E \cdot ds$$ التغير في الطاقة الكامنة للمنظومة

$$= -(-q_0)\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

25.2. فروق الكمون في حقل كهربائي منتظم (ثابت القيمة والجهة)

إن المعادلتين (25.1) و (25.3) صحيحتين في كافة الحقول الكهربائية، سواءً أ كانت منتظمة أم متغيرة، لكن يمكن تبسيطهما من أجل الحقول المنتظمة (ثابتة القيمة والجهة). أولاً لنعتبر (لندرس) حقلاً منتظماً موجهاً على امتداد محور y السالب، كما هو مبين في الشكل (25.2)(a).



الشكل (25.2): (a) عندما يكون اتجاه الحقل الكهربائي E نحو الأسفل، يكون للنقطة B كمون كهربائي أخفض من كمون النقطة A. وعندما تتحرك شحنة اختبارية من النقطة A إلى النقطة B، فإن المنظومة حقل-شحنة تفقد طاقة كامنة كهربائية. (b) وعندما يتحرك جسم كتلته m نحو الأسفل مع اتجاه حقل الثقالة (الجاذبية) الأرضية g، فإن المنظومة حقل-جسم تفقد طاقة كامنة ثقالية.

لنحسب فرق الكمون بين نقطتين A و B تفصل بينهما مسافة $d = |s|$، حيث إن الإزاحة s تتم بصورة **موازية لخطوط** الحقل. إن المعادلة (25.3) تعطي:

$$V_B - V_A = \Delta V = -\int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\int_A^B (E \cos\theta^{\circ})\, ds = -\int_A^B E ds$$

لأن جهة الحقل بين النقطتين A و B **موازية** للإزاحة ds، وبالتالي ds يكون يوازي لـ E، وبالتالي فإن $\cos\theta^{\circ} = \cos 0 = 1$.

ملاحظة: لقد وضعنا النقطة (·) بين ds و E للدلالة على الجداء السلمي.

وبما أن الحقل الكهربائي E ثابت القيمة، فإنه يمكن إخراجه من تحت إشارة التكامل؛ وهذا يعطي:

فرق الكمون بين نقطتين في $V_B - V_A = \Delta V = -E\int_A^B ds = -Ed$ (25.6)

حقل كهربائي منتظم

تدل إشارة السالب على أن الكمون الكهربائي عند النقطة B يكون أقل من الكمون الكهربائي الذي عند النقطة A؛ أي $V_B < V_A$. إن خطوط الحقل الكهربائي تتجه دائماً باتجاه تناقص الكمون الكهربائي، كما هو مبين في الشكل (25.2)(a).

* الآن، لنفرض أن شحنةً اختبارية (موجبة) q_0 تتحرك من A إلى B. عندئذ، يمكننا أن نحسب التغير في الطاقة الكامنة للمنظومة شحنة–حقل من المعادلتين (25.3) و (25.6):

$$\Delta U = q_0 \Delta V = q_0(-Ed) = -q_0 E d \qquad (25.7)$$

من هذه النتيجة، نلاحظ بأنه إذا كانت الشحنة الاختبارية q_0 موجبة، فإن التغير في الطاقة الكامنة ΔU يكون سالباً. ومن ذلك نستنتج بأن **المنظومة المكونة من شحنة موجبة –وحقل كهربائي تفقد طاقة كامنة كهربائية عندما تتحرك هذه الشحنة باتجاه الحقل**. وهذا يعني أن الحقل الكهربائي يقوم بعمل على الشحنة الموجبة عندما تتحرك هذه الشحنة باتجاه الحقل الكهربائي. وهذا مشابه للعمل الذي يقوم به حقل الثقالة الأرضية على جسم يسقط بحرية، كما هو مبين في الشكل (25.2)(b).

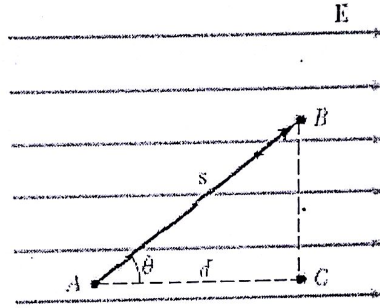
وإذا ما انطلقت (حُررت) شحنة اختبارية سالبة من السكون في هذا الحقل، فإنها ستخضع لقوة كهربائية قدرها $q_0 E$ في اتجاه الحقل E؛ أي نحو الأسفل في الشكل (25.2)(a). لذلك فهي تتسارع باتجاه الأسفل، مكتسبة طاقة حركية. عندما تكتسب الجسيمة المشحونة طاقة حركية، فإن المنظومة شحنة–حقل تفقد كمية مساوية من الطاقة الكامنة. إن هذا لا يجب أن يكون مفاجئاً، لأنه ببساطة يعبر قانون انحفاظ الطاقة في منظومة معزولة[4] محافظة، كما ذكرنا في الفصل 8.

إذا كانت الشحنة الاختبارية q_0 سالبة، فإن التغير في الطاقة الكامنة ΔU، في العلاقة (25.7)، يكون موجباً، والحال يكون معكوساً: **فالمنظومة المكونة من شحنة سالبة–وحقل كهربائي تكتسب**

[4] لا وجود لقوة أخرى سوى قوة الحقل الكهربائي الموجهة للأسفل.

طاقة كامنة كهربائية عندما تتحرك هذه الشحنة باتجاه الحقل. فإذا ما انطلقت (حُررت) شحنة سالبة من السكون، فإنها ستتسارع في اتجاه معاكس لاتجاه الحقل. وحتى تتحرك شحنة سالبة في اتجاه الحقل، يجب أن تُطبق عليها قوة من عاملٍ خارجي، وأن يُفرض على الشحنة عمل سالب.

** الآن لنعتبر (لندرس) حالة أكثر عمومية وهي حالة جسيمة مشحونة تتحرك بين A و B في حقل كهربائي منتظم بحيث تكون متجهة الانزياح *s* **غير موازية** لخطوط الحقل، كما هو مبين في الشكل (25.3).



الشكل (25.3): حقل كهربائي منتظم يتجه على طول محور x الموجب. إن النقطة B تكون عند كمون كهربائي أخفض من الكمون الذي عند النقطة A. أما النقطتين B و C فكلاهما تكونان عند نفس الكمون الكهربائي.

في هذه الحالة، إن المعادلة (25.3) تعطي:

$$\Delta V = -\int_A^B E \cdot ds = -E \cdot \int_A^B ds = -E \cdot s \qquad (25.8)$$

$-E\,S\cos\theta = -E\,d$

حيث، في هذه الحالة أيضاً، أخرجنا E من التكامل لأنه ثابت.

ويكون التغير في الطاقة الكامنة للمنظومة شحنة-حقل:

$$\Delta U = q_0 \Delta V = -q_0 E \cdot s \qquad (25.9)$$

تغير الطاقة الكامنة عندما يتحرك جسيم مشحون في حقل كهربائي منتظم

** أخيراً، نستنتج من المعادلة (25.8) أن كافة النقاط التي تقع في مستوٍ معامد لحقل كهربائي منتظم يكون لها نفس الكمون الكهربائي. يمكننا رؤية ذلك في الشكل (25.3)، حيث إن فرق الكمون $V_B - V_A$ يكون مساوٍ لفرق الكمون $V_C - V_A$، لذلك، فإن $V_B = V_C$. (برهن هذا لنفسك بإجراء الجداء السلمي $E \cdot s$ من أجل $s_{A\to B}$، باعتبار زاوية كيفية θ بين E و s كما هو مبين في الشكل (25.3)، والجداء السلمي من أجل $s_{A\to C}$، باعتبار $\theta = 0$). ولهذا يطلق اسم سطح تساوي الكمون **equi-potential surface** **على أي سطح مكون من توزع مستمر من النقاط التي تمتلك نفس الكمون الكهربائي.**

إن سطوح تساوي الكمون لحقل كهربائي منتظم تتكون من أسرة من المستويات المتوازية التي تكون معامدة للحقل الكهربائي. وإن سطوح تساوي الكمون من أجل حقول له تنسيق symmetries آخر مخالف سنشرحها في مقاطع (فقرات) لاحقة.

اختبار سريع (25.3):

إن النقاط المدرجة في الشكل (25.4) موجودة على سلسلة من سطوح تساوي الكمون المرافقة لحقل كهربائي. المطلوب، رتب، من الأكبر إلى الأصغر، العمل المنجز من الحقل الكهربائي على جسيمة مشحونة إيجاباً (بشحنة موجبة) تتحرك:

من A إلى B؛

من B إلى C؛

من C إلى D؛

من D إلى E؛



الشكل (25.4) للاختبار السريع (25.3): أربع سطوح تساوي–كمون.

اختبار سريع (25.4):

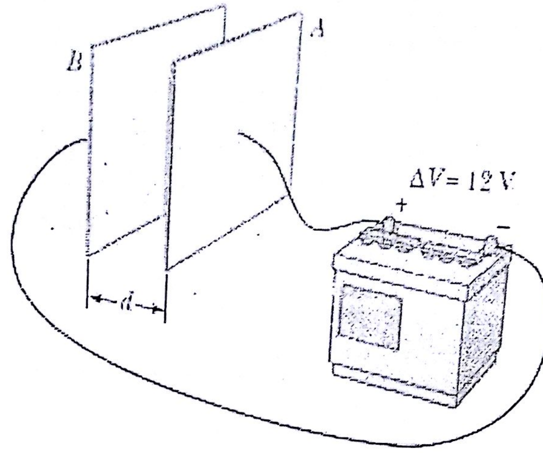
من أجل سطوح تساوي الكمون التي في الشكل (24.4)، ما هو الاتجاه التقريبي للحقل الكهربائي؟ (a) خارج من صفحة الكتاب (b) ضمن صفحة الكتاب (c) نحو الحافة اليمنى لصفحة الكتاب (d) نحو الحافة اليسرى لصفحة الكتاب (e) نحو الحافة العليا لصفحة الكتاب (f) نحو الحافة السفلى لصفحة الكتاب؟.

مثال (25.1): الحقل الكهربائي بين صفيحتين متوازيتين لهما شحن متعاكسة

إن كل بطارية تنتج فرق كمون خاص ΔV بين النواقل التي توصل إلى طرفيها (قطبيها). توصل بطارية $12\ V$ إلى صفيحتين متوازيتين بينهما مسافة فاصلة قدرها $d = 0.30\ cm$، كما هو مبين في الشكل (25.5). بفرض أن الحقل الكهربائي بين الصفيحتين منتظم[5]. المطلوب: أوجد قيمة الحقل الكهربائي بين الصفيحتين.

---

[5] (إن هذا الافتراض يكون صحيحاً إذا كانت المسافة الفاصلة بين الصفيحتين صغيرة بالمقارنة مع أبعاد كل من الصفيحتين، وإذا لم تدخل بالاعتبار تلك المواقع التي تقع قرب بحواف الصفيحتين). (This



الشكل (25.5) للمثال (25.1): بطارية $12\ V$ موصولة إلى صفيحتين متوازيتين. إن الحقل بين الصفيحتين يمتلك قيمة تعطى بفرق الكمون ΔV مقسوماً على المسافة الفاصلة بين الصفيحتين d.

الحل: إن الحقل الكهربائي بين الصفيحتين يتجه من الصفيحة الموجبة A إلى الصفيحة السالبة B، والصفيحة الموجبة تكون عند كمون كهربائي أكبر من الكمون الذي تكون عنده الصفيحة السالبة.

إن فرق الكمون بين الصفيحتين يجب أن يكون مساوٍ لفرق الكمون بين طرفي البطارية. حيث يمكننا قبول ذلك بمعرفة أن كافة النقاط على الناقل تكون متوازنة عند نفس الكمون الكهربائي[6]؛ بمعنى أنه لا يوجد فرق في الكمون بين طرف البطارية وأي جزء من الصفيحة التي يتصل بها هذا الطرف. لذلك، فإن قيمة الحقل الكهربائي بين الصفيحتين، بحسب المعادلة (25.6)، يكون:

$$E = \frac{|V_B - V_A|}{d} = \frac{12\ V}{0.30 \times 10^{-2} m} = 4.0 \times 10^3\ V/m$$

إن تشكيلاً كهذا للصفيحتين؛ أي كما في الشكل (25.5)، يدعى بالمكثفة ذات الصفيحتين المتوازيتين، وهو سيدرس بتفصيل أكبر في الفصل 26 .

مثال (25.2): حركة بروتون في حقل كهربائي منتظم

ينطلق (يُحرر) بروتون من السكون في حقل كهربائي منتظم قيمته $8.0 \times 10^4\ V/m$، كما هو مبين في الشكل (25.6)، فيعاني إزاحة باتجاه الحقل E قدرها $0.50\ m$. المطلوب أوجد:

(A) التغير في الكمون الكهربائي بين النقطتين A و B.

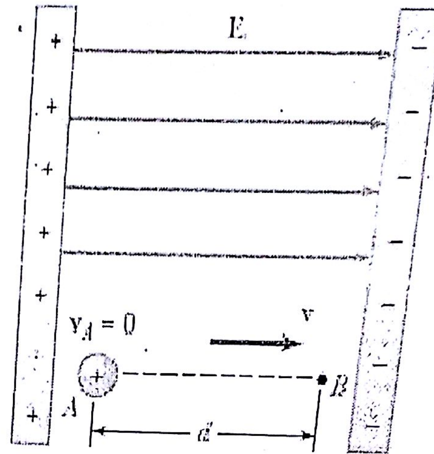
(B) التغير في الطاقة الكامنة للمنظومة بروتون–حقل من أجل الإزاحة المعطاة.

(C) سرعة البروتون مباشرة بعد أن تنجز الإزاحة $0.50\ m$ في الحقل الكهربائي.

---

[6] إن الحقل الكهربائي يتلاشى ضمن أي ناقل موجود في توازن كهرساكن؛ وهكذا فإن تكامل المسار بين أي نقطتين في الناقل يجب أن يكون معدوماً. إن شرحاً أكثر كمالاً لهذه القضية معطى في المقطع (25.6).

ماذا سيحدث لو؟: إذا كان الحال تماماً كما في الشكل (25.6) لكن من دون وجود بروتون؟ هل ستبقى هنالك إجابة للطلبين (A) و(B) اللذين في هذا المثال؟.



الشكل (25.6) للمثال (25.2): بروتون يتسارع من نقطة A إلى نقطة B باتجاه الحقل الكهربائي.

الحل:

(A): بما أن البروتون يتحرك باتجاه الحقل الكهربائي، فإننا نتوقع أن ينتقل إلى موضعٍ ذي كمون كهربائي أخفض. بحسب المعادلة (25.6)، فإن التغير في الكمون الكهربائي يكون:

$$\Delta V = -Ed = -(8.0 \times 10^4 V/m)(0.50)m = -4.0 \times 10^4\ V$$

إن الإشارة السالبة تعني أن الطاقة الكامنة للمنظومة بروتون−حقل تتناقص في أثناء تحرك البروتون باتجاه الحقل الكهربائي. في أثناء تسارع البروتون باتجاه الحقل، البروتون يكتسب طاقةً حركية، وبنفس الوقت، المنظومة تفقد طاقةً كامنة كهربائية.

(B): إن التغير في الطاقة الكامنة للمنظومة بروتون−حقل يعطى بالمعادلة (25.3)، وبالتالي:

$$\Delta U = q_0 \Delta V = e\,\Delta V = (1.6 \times 10^{-19}\ C)(-4.0 \times 10^4\ V) = -6.4 \times 10^{-15}\ J$$

(C): إن المنظومة بروتون−حقل معزولة محافظة ضمناً؛ أي لا يؤثر على الشحنة أي شيء آخر سوى الحقل، لذلك فإن الطاقة الميكانيكية للمنظومة تكون محفوظة؛ أي أن:

$$\Delta K + \Delta U = 0$$

$$\left(\frac{1}{2}mv^2 - 0\right) + e\,\Delta V = 0 \implies$$

$$v = \sqrt{\frac{-(2e\,\Delta V)}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{-2(1.6 \times 10^{-19} C)(-4.0 \times 10^4\ V)}{1.67 \times 10^{-27} kg}} = 2.8 \times 10^6\ m.s$$